

**Использование компьютерных методов для повышения
качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок**

С.В. Мартыненко, О.М. Огородникова**, В.М. Грузман***

** НПК Уралвагонзавод*

*** Уральский государственный технический университет – УПИ*

Введение

Наиболее нагруженными и ответственными деталями железнодорожных вагонов являются литые детали грузовой тележки. Литые заготовки обсуждаемых деталей изготавливаются из стали 20ГЛ различными методами гравитационного литья; их вес достигает несколько сотен килограммов, толщина стенок составляет 15-20 мм при габаритных размерах более 2 метров (рис.1). Такие отливки классифицируются как крупногабаритные тонкостенные стальные отливки [1]; их качество оказывается важным условием обеспечения долговечности и надежности работы вагонных деталей в нагруженных состояниях [2].

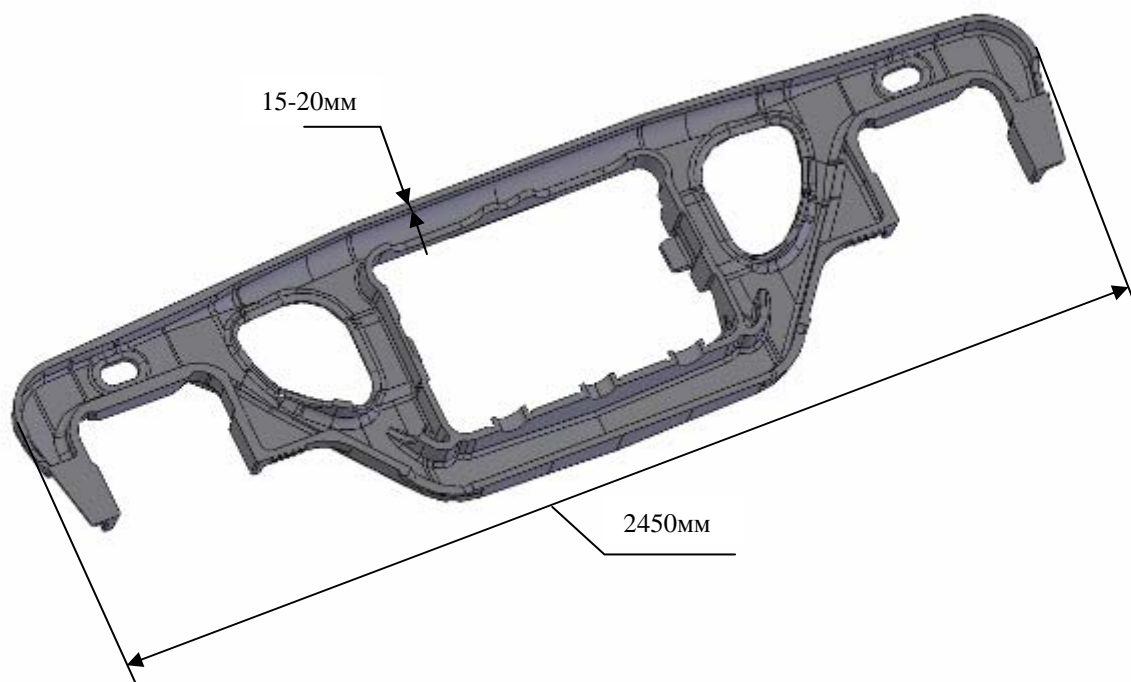


Рис.1. Объемная модель литой детали «Рама боковая» в разрезе

20ГЛ – литейная хладостойкая сталь, которая используется для изготовления деталей, работающих в условиях низких температур (до -60°C) [3], прежде всего – в составе транспортных средств северного исполнения. В связи с необходимостью повысить срок службы литых железнодорожных деталей в последнее время вновь разгорелись дискуссии о влиянии концентрации химических элементов на механические свойства стали 20ГЛ. Вопрос дополнительно изучен в работе [4], авторами которой были выплавлены стали с небольшими вариациями от химического состава, определенного государственным стандартом, и после математической обработки экспериментальных результатов методом дробного факторного эксперимента установлена зависимость основных механических ха-



рактических характеристик от легирующих элементов. Из полученных зависимостей следует, что механические свойства стали после различных видов термообработки в значительной мере зависят от содержания в ней С и Мн: с их увеличением уменьшается количество феррита в структуре, что приводит к возрастанию прочностных характеристик при снижении пластичности. Показано, что химический состав $0,21\text{C} - 1,52\text{Mn} - 0,33\text{Si} - 0,028\text{P} - 0,036\text{S} - 0,4\text{Cr} - 0,13\text{Ni} - 0,2\text{Cu} - 0,003\text{Ti} - 0,035\text{Al}$ является наилучшим и обеспечивает следующие свойства стали: $\sigma_{\text{т}}=400$ МПа; $\sigma_{\text{в}}=630$ МПа; $\delta=23\%$; $\Psi=57\%$; $\text{KCU}_{-60}=0,75\ldots 0,83$ кгс/мм².

Многолетний опыт производства крупногабаритных тонкостенных отливок из стали 20ГЛ на Уралвагонзаводе позволяет предположить, что основным направлением улучшения их эксплуатационных характеристик является не изменение химического состава стали в пределах 1% легирующих элементов, а в первую очередь, совершенствование технологических процессов изготовления и заливки форм за счет внедрения современных методов проектирования и подготовки производства. В частности, применение интегрированных компьютерных технологий позволяет ускорить поиск верного решения, и вместе с тем, открывает пути к тесному взаимодействию конструкторских и технологических подразделений на предприятии в рамках единого информационного пространства.

Сквозные технологии проектирования и подготовки литейного производства

Современная концепция проектирования и подготовки производства предполагает выполнение всех проектных и технологических работ в едином информационно-программном пространстве. В данной концепции оптимизация технологий и конструкторская проработка проекта ведется одновременно и параллельно, что обеспечивается, в первую очередь, параметризацией геометрических моделей. Параметрические функции автоматически обеспечивают идентичность размеров во всех электронных документах и файлах, связанных с конкретным трехмерным построением, быстро и точно изменяют чертежи, конструкторскую и технологическую документацию, когда в конструкцию вносятся изменения.

Отдел главного металлурга на Уралвагонзаводе применяет сквозные технологии проектирования и подготовки производства CAD/CAE/CAM, включающие объемное конструирование литых деталей и литейной оснастки, компьютерное моделирование литейных технологий и изготовление оснастки на станках с ЧПУ. Следует отметить, что сложная геометрическая форма крупногабаритных тонкостенных деталей (рис.2) предопределяет ряд специфических проблем, которые приходится преодолевать технологам.

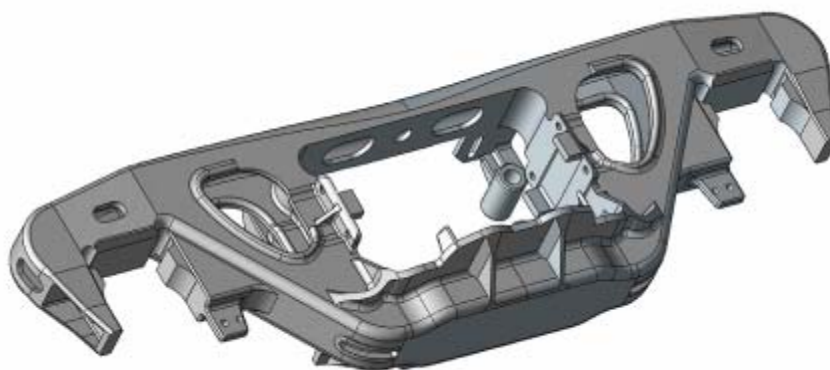


Рис.2. Объемная модель литой детали «Рама боковая»



Перечислим этапы сквозной работы с использованием компьютерных систем CAD/CAE/CAM и подробнее остановимся на компьютерном моделировании литейных процессов.

Этап 1 CAD. Построение геометрической модели отливки технологом на базе геометрической модели детали, полученной от конструктора. Высокую скорость объемного конструирования в конструкторском бюро (КБ) литейной оснастки обеспечивает использование различными заводскими структурами единой программной среды. Тогда в дереве построений можно сохранить исходную модель детали и результат ее прямого редактирования, который отличается от оригинала добавленными припусками на механообработку и закрытыми малыми отверстиями. Литейные уклоны будут внесены позже – на третьем этапе, когда технолог назначит расположение отливки в форме.

Этап 2 CAE. Компьютерный анализ литейных особенностей геометрии отливки, выявление тепловых узлов по распределению температуры при виртуальном наблюдении кристаллизации отливки без прибылей и литниковой системы. На этом этапе вычисляется геометрический модуль, что позволяет технологу назначить количество, расположение и размер прибылей. Здесь же можно планировать мероприятия по направленному теплоотводу – применение холодильников, вставок и т.п.

Этап 3 CAD. Объемное конструирование литниково-питающей системы, исходя из выявленного расположения изолированных зон расплава в отливке. Вариантов расположения отливки в форме и связанных с этим литниково-питающих систем может быть несколько. Все варианты сохраняются в дереве построений до принятия окончательного решения о наиболее эффективной конструкции.

Этап 4 CAE. Проверка эффективности литниково-питающей системы, компьютерное моделирование литейных процессов и вычисление служебных параметров. На этом этапе расчет теплоотвода ведется с учетом реальных размеров формы и холодильников, но подробно построенные модели стержней не требуются. Оценивается направленность процессов кристаллизации и выявляются горячие зоны по эволюции температурных полей, маркируются изолированные объемы расплава как возможные концентраторы литейных дефектов, прогнозируются усадочные дефекты и горячие трещины, рассчитывается коробление отливки в условиях затрудненной усадки и линейные усадочные коэффициенты. Если выбранный вариант расположения отливки в форме, подвод металла, а также размер и расположение прибылей и холодильников не удовлетворяет требованиям качества отливки, технолог возвращается к предыдущему этапу, вносит изменения в объемную модель и повторяет расчет. По окончании этого расчетного этапа в программе CAD формируется пригодный вариант литниково-питающей системы, который обеспечивает отсутствие прогнозируемых дефектов в отливке. Именно этот вариант реализуется в производстве на следующих этапах, направленных непосредственно на изготовление качественной отливки.

Этап 5 CAD. Конструирование стержней, стержневых ящиков и моделей с использованием сборочной компоновки отливки и литниково-питающей системы.

Этап 6 CAM. Подготовка управляющих программ для изготовления моделей и стержневых ящиков на станках с ЧПУ (черновая и чистовая обработка).

Многочисленные практические подтверждения эффективности описанной методики, позволяют сделать выводы о неоспоримых преимуществах сквозных технологий в литейном производстве.

Компьютерное моделирование литейных процессов

В мировой практике последнего десятилетия компьютерная разработка оптимальных технологий, исключающих образование литейных дефектов, становится важным эта-



пом работы технолога. Вместе с тем, очень мало появляется сообщений в печати и в трудах многочисленных конференций о полезном и эффективном использовании компьютерных программ литейщиками российских заводов. Обсуждение причин сложившейся ситуации может стать темой отдельной публикации, а в рамках данной статьи мы изложим опыт Уралвагонзавода, который убедительно указывает на необходимость адаптации компьютерных инструментов к специфике предприятия. В связи с этим, представляет интерес компьютерное исследование процессов формирования крупногабаритных тонкостенных стальных отливок [5], верификация компьютерных расчетов и разработка методик, позволяющих настроить программы компьютерного моделирования литейных технологий на конкретные условия производства данного типа отливок.

К нашим деталям, прежде всего, предъявляется требование повышенной усталостной прочности. Характеристики сопротивления усталостному разрушению зависят как от конструкции детали, так и от всей совокупности технологических операций, обеспечивающих воплощение замыслов конструкторского бюро. Если форма деталей создается традиционными способами литья, то следует учитывать, что в силу специфики процессов кристаллизации структура литейных сталей наследует усадочные эффекты, и это допустимо согласно действующей нормативно-технической документации. Предел выносливости литейных сталей, содержащих усадочные микропоры, анализируется многими исследователями в связи с актуальностью технических приложений вопроса, например, в работе [6] экспериментально и в расчетах методом конечных элементов доказывалось, что предел выносливости зависит от формы дефектов и характера нагружения. При этом исключительную роль в сопротивлении усталостному разрушению играет качество поверхности и отсутствие микродефектов в поверхностных слоях.

КБ литейной оснастки Уралвагонзавода постоянно исследует возможности различных программных сред для моделирования технологических процессов с целью надежного выявления возможных дефектов и их предотвращения на стадии проектирования. Все известные по рекламным кампаниям компьютерные программы (LVMflow, Poligon, Magma, ProCast, SolidCast, WinCast, Star-Cast) схожи по функционалу и одинаковым образом решают поставленную задачу. Прогнозирование литейных дефектов в них базируется на расчетах температурных полей, но это лишь теоретическая часть работы. Практическая часть работы заключается в том, что, основываясь на результатах расчетов, в первую очередь, конструируется литниково-питающая система, обеспечивающая направленную кристаллизацию отливки и отсутствие усадочных дефектов в критических областях.

Анализ температурных полей и литейных дефектов проводится компьютерными программами последовательно в трех функциональных модулях: 1) в препроцессоре генерируется расчетная сетка; 2) в процессоре выбираются начальные и граничные условия; задаются свойства материалов; решаются на сетке дифференциальные уравнения и вычисляются первичные узловые параметры – значения температуры; 3) в постпроцессоре расчетные результаты обрабатываются и представляются в графическом виде; просматриваются и анализируются производные расчетные характеристики – скорости и градиенты, пространственная локализация усадочных дефектов.

Принципиально важной и трудно преодолимой проблемой компьютерного моделирования является достоверность используемой базы данных, поскольку точность прогнозов полностью зависит от моделей поведения материалов, заложенных в расчет. Важно правильно задать теплофизические характеристики стали и материалов формы (а также стержней, холодильников, вставок, стяжек и т.п.) во всем исследуемом температурном интервале. Результат зависит также от зазоров, покрытий, способности металла растворять газы и выделять их при затвердевании.



Отсутствием достоверных сведений о теплофизических свойствах всех составляющих техпроцесса объясняем мы неудачу, постигшую американскую программу SolidCast при решении нашей задачи. Тестирование программы было предельно объективным. Расчеты для стальной детали «Балка надрессорная» (рис.3) выполнены при поставке на завод оборудования зарубежными партнерами, которые, согласно договору, были обязаны произвести на этом оборудовании годные детали. Пробные детали изготовлены с применением аналогичного оборудования на зарубежном предприятии зарубежными специалистами, затем там же разрезаны и подробно изучены по всем критическим сечениям. Местоположение, размеры и характер реально выявленных дефектов оказались совсем не такими, как предсказала программа SolidCast. Компьютерные расчеты с практикой в данном случае не совпали.

После получения неверных прогнозов по усадочным дефектам в американской программе SolidCast на Уралвагонзаводе с участием специалистов УГТУ-УПИ проведены верификационные работы для настройки российской программы LVMflow. Проведенная корректировка позволяет достаточно точно выявлять усадку в стальных отливках средствами LVMflow.

Дальнейшее развитие компьютерного моделирования литейных технологий направлено, прежде всего, на анализ напряженно-деформированных состояний затвердевающей отливки. Расчет напряжений и деформаций позволяет прогнозировать появление трещин и напрямую вычислять линейные параметры затрудненной усадки, выявлять коробление, точно назначать размеры моделей и стержней. Это направление обозначено во всех программах, но в настоящее время недостаточно проработано на уровне математической теории образования литейных трещин.

Прочность литых деталей активно дискутируется всеми участниками и потребителями машиностроительной отрасли. Обсудим в качестве примера важный нюанс, один из тех многих, которые следовало бы учитывать. В существующей конструкторской практике расчет прочности производится в предположении равномерного распределения механических свойств и нулевого уровня исходных остаточных напряжений в нагружаемой конструкции. Вместе с тем, любая технология изготовления привносит свою специфику в структуру и свойства детали. Так, в литой детали неравномерно распределены два важных параметра, определяющих прочностные характеристики, а именно, плотность металла и размер зерна. Оба параметра в значительной степени зависят от расположения и интенсивности горячих зон, которые в свою очередь, обусловлены характером теплоотвода, местоположением холодильников и прибылей. Наибольшее снижение прочности происходит в тепловых узлах, где при кристаллизации формируются более крупные зерна и снижается за счет усадки плотность металла. Такие изменения, согласно принятым нормативам, могут находиться в пределах допустимых отклонений и мало изменяются при термической обработке. Мы не можем ожидать, в частности, интенсивное измельчение зерна за счет рекристаллизации в литейной стали, где нет предварительной накачки энергии в кристаллическую решетку пластическим деформированием.

При конструировании литых деталей такого рода эффекты обязательно следует учитывать. В крупногабаритных тонкостенных стальных отливках они играют решающую роль. В предыдущие годы, когда при проектировании не использовались компьютерные технологии, неучтенные в расчете нюансы корректировались эмпирически – по наблюдению за статистикой разрушений. Споры нет, это длительный, затратный и наилучший способ совершенствования конструкции, но он не терпит множественных и значительных изменений технологических процессов. Внедрение компьютерных программ, с одной стороны, создает иллюзию одномоментного решения всех проблем, с другой стороны, действи-



тельно позволяет проследить те зависимости, которые ранее при проектировании не принимались во внимание.



Рис.3. Результат прогнозирования усадочных дефектов в SolidCast и реальное расположение дефектов, не совпадающее с расчетным ожиданием

Таким образом, чтобы совершенствовать компьютерное проектирование литых деталей, нам предстоит выяснить основные закономерности влияния специфики литейных технологий на прочность конкретных деталей, выразить эти закономерности математически и разрешить их настройку через интерфейсы компьютерных программ.

Совершенствование литейной технологии и получение бездефектных отливок

Основной вид повреждений литых вагонных деталей при эксплуатации – развитие усталостных трещин. Усталостные испытания таких деталей – наиболее надежный способ оценки их эксплуатационной стойкости, но эти испытания трудоемки, требуют существенных затрат времени и проводятся выборочно [2]. Отличной альтернативой натурным испытаниям является компьютерное моделирование, прогнозирование и управление эксплуатационными характеристиками деталей на стадии конструирования и разработки технологических процессов. В частности, большой интерес представляет возможность прогнозировать компьютерными методами появление горячих трещин в отливках [7]. К сожалению, на текущий момент отсутствует многофакторная математическая модель всех процессов, обуславливающих формирование и развитие трещин в отливках. Многообразие причин и условий образования трещин, а также отсутствие полного математического описания этого явления, становится причиной ненадежной работы программных модулей, призванных маркировать трещины в остывающих отливках.



Раннему появлению трещин в литых деталях вагонов может способствовать наличие литейных дефектов. Поры и усадочные раковины являются концентраторами напряжений и ускоряют процесс образования макротрещины, снижая усталостную прочность на 30% [8]. Оказываясь в зоне высоких напряжений детали, они становятся очагами зарождения усталостных трещин и разрушения детали.

На долговечность литых деталей в большей степени влияют поверхностные литейные дефекты; значение усадочных дефектов, залегающих в теле отливки, для процессов образования и развития усталостной трещины, не является столь существенным. В работе [9] проведен анализ влияния литейных дефектов на циклическую прочность деталей по накопленным данным усталостных испытаний боковых рам при асимметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии 0,29 на базе 10 млн циклов. Для получения сопоставимых результатов на всей совокупности испытанных деталей были отобраны 56 боковых рам, разрушившихся по внутреннему углу буксового проема. По дефектности рамы отнесены к трем группам: практически бездефектные (19%), с допускаемыми дефектами (49%), и с дефектами, превышающими по размерам нормы ТУ 3-779-73 на стальные вагонные оливки (32%). Авторы выяснили, что допускаемые дефекты снижают среднее значение предела выносливости на 13%, а недопускаемые – на 25%.

Существуют дефекты, влияние которых на снижение циклической прочности находится в пределах рассеяния выносливости бездефектных деталей. Влияние размеров литейных дефектов на величину коэффициента концентрации напряжений исследовано для наиболее напряженной зоны по двум контролируемым параметрам: площади дефекта в изломе и глубине залегания дефекта от поверхности. Максимальные размерные параметры дефектов, влияние которых на снижение циклической прочности мало и соизмеримо с влиянием неровностей литой поверхности: площадь 22 мм² и глубина залегания 5 мм. С учетом вероятностных ограничений следует считать допустимыми размерные параметры дефектов по площади менее 54 мм² и по глубине залегания более 10 мм. Поскольку площадь дефекта при неразрушающем контроле определить трудно, можно регламентировать максимально допустимый линейный размер литейного дефекта на уровне 5 мм [9]. Дефекты меньшего размера не влияют на усталостную прочность литых деталей грузовых тележек вагонов.

Уралвагонзавод постоянно совершенствует технологии литья для снижения вероятности образования литейных дефектов критического размера в наиболее повреждаемых зонах литых деталей. На рис.4 показан один из фрагментов работы, выполненной с использованием компьютерных систем. В результате исключается появление технологических трещин в литых деталях грузовых тележек вагонов – боковых рамах.

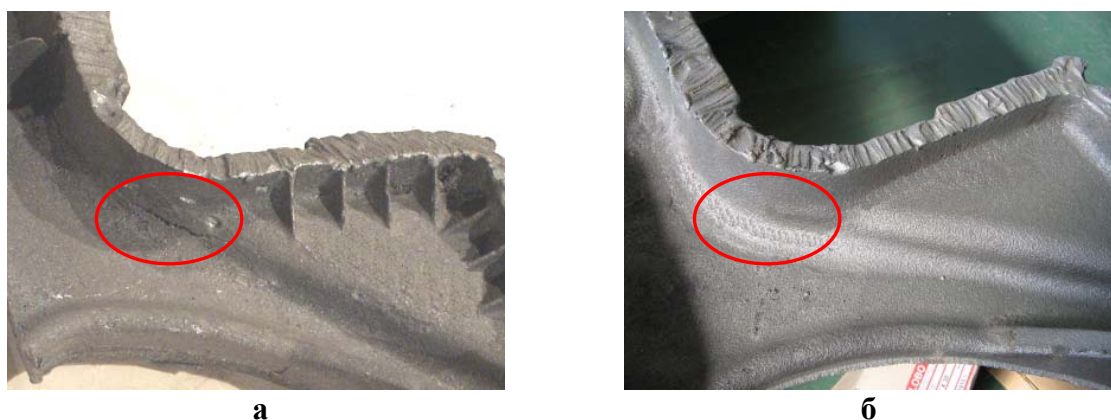


Рис.4. Результат совершенствования технологии литья деталей «Рама боковая» по горячим трещинам: а – исходный вариант, б – улучшенный вариант



Итоги

С помощью компьютерных технологий разработана и апробирована методика прогнозирования литейных дефектов в крупногабаритных тонкостенных стальных отливках, которая успешно используется в КБ литейной оснастки ОАО «НПК Уралвагонзавод» и позволяет получать расчетные результаты с достоверностью не менее 90%. В настоящее время на ОАО «НПК Уралвагонзавод» разработана и внедрена технология изготовления детали «Рама боковая», которая позволила снизить уровень брака по горячим трещинам с 35% до 5%.

Список литературы

1. Производство стальных отливок: Учебник для вузов / Козлов Л.Я., Колокольников В.М., Вдовин К.Н. и др. / Под ред. Л.Я.Козлова. – М.: МИСИС, 2003. 352 с.
2. Иващенко Ю.М., Солдатов В.Г. Взаимосвязь механических свойств с эксплуатационными характеристиками стальных деталей железнодорожного транспорта. Литейное производство, 2008, №6. С.15-17.
3. Солнцев Ю.П. Литейные хладостойкие стали / Ю.П.Солнцев, А.К.Андреев, Р.И.Гречин. М.:Металлургия, 1991 – 176 с.
4. Кульбовский И.К., Солдатов В.Г., Мануев М.С. Повышение механических свойств низколегированной стали для ответственных отливок железнодорожного транспорта. Заготовительные производства в машиностроении, 2006, №4. С.3-6.
5. Огородникова О.М., Пигина Е.В., Мартыненко С.В. Компьютерное моделирование горячих трещин в литых деталях. Литейное производство, 2007, №2, С.27-30.
6. Morel F. and etc. Comparison between defects and micro-notches in multiaxial fatigue – The size effect and gradient effect. International journal of fatigue, 2009, V.31. P.263-275. © Elsevier Ltd.
7. Огородникова О. М., Мартыненко С.В., Грузман В.М. Прогнозирование кристаллизационных трещин в стальных отливках. Литейное производство, 2008, №10, С.29-34.
8. Пастухов М.И. Оценка несущей способности литых деталей тележек грузовых вагонов после длительной эксплуатации. Вестник Полоцкого государственного университета, серия В: прикладные науки, 2005, № 12. С.160-163.
9. Северинова Т.П. Расчетно-теоретическое обоснование живучести боковых рам и надрессорных балок с допустимыми дефектами. Вестник ВНИИЖТ, 2005, № 5.

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы компьютерной подготовки литейного производства с использованием программного обеспечения CAD/CAE/CAM; обсуждаются проблемы компьютерного моделирования литейных технологий и обеспечения высокого качества отливок на стадии разработки технологических процессов; представлен опыт совершенствования технологий литья крупногабаритных тонкостенных стальных отливок и снижения уровня брака по горячим трещинам.

Ключевые слова

CAD/CAE/CAM, компьютерное моделирование, гравитационное литье, крупногабаритные тонкостенные стальные отливки, литейные дефекты.

Application of computer methods to enhance the quality of large dimension thick-walled steel castings

S. Martynenko, O. Ogorodnikova, V. Grusman

Abstract

The issue of computer preproduction in foundry with use of CAD/CAE/CAM software is viewed; the problems of cast simulation and ensuring high quality of castings at the stage of



technological processes design are discussed; the experience of cast technologies enhancement is performed for large dimension thick-walled steel castings to decrease its reject limit in hot cracking.

Key words

CAD/CAE/CAM, simulation, gravity cast, large dimension thick-walled steel castings, cast defects.

